

Levantamento bibliométrico de tecnologias de captura de gás carbônico de fontes energéticas



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
26**

**Levantamento bibliométrico de tecnologias de
captura de gás carbônico de fontes energéticas**

*Sílvio Vaz Jr.
Ana Paula Rodrigues de Souza
Bruno Eduardo Lobo Baeta*

***Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2021***

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na

Embrapa Agroenergia
Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº
Ed. Embrapa Agroenergia
Caixa Postal 40315
CEP 70770-901, Brasília, DF
Fone: +55 (61) 3448-1581
Fax: +55 (61) 3448-1589
www.embrapa.br/agroenergia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroenergia

Presidente
Patrícia Verardi Abdelnur

Secretária-Executiva
Lorena Costa Garcia Calsing

Membros
Adilson Kenji Kobayashi
André Pereira Leão
Dasciana de Sousa Rodrigues
Emerson Léo Schultz
Felipe Brandão de Paiva Carvalho
Thais Fabiana Chan Salum
Wesley Gabriel de Oliveira Leal

Supervisão editorial e revisão de texto
Luciane Chedid Melo Borges

Normalização bibliográfica
Iara Del Fiacco Rocha (CRB-1/2169)

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Maria Goreti Braga dos Santos

Fotos da capa
Arquivo Eletrobras CGT Eletrosul (usina termoeletrica em Candiota, RS)
Silvio Vaz Jr. (plantio de milho em Campo Alegre, GO)

1ª edição
Publicação digital (2021)

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Agroenergia

Vaz Júnior, Silvio.

Levantamento bibliométrico de tecnologias de captura de gás carbônico de fontes energéticas / Silvio Vaz Júnior, Ana Paula Rodrigues de Souza, Bruno Eduardo Lobo Baeta. – Brasília, DF : Embrapa Agroenergia, 2021.

PDF (32 p.). – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-0395 ; 26)

1. Dióxido de carbono. 2. Aquecimento. 3. Efeito estufa. I. Souza, Ana Paula Rodrigues de. II. Baeta, Bruno Eduardo Lobo. III. Embrapa Agroenergia. IV. Título. V. Série.

CDD 630.2515

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução.....	7
Revisão bibliográfica	8
Metodologia do levantamento bibliométrico	23
Resultados e discussão.....	24
Considerações finais	28
Referências	29

Levantamento bibliométrico de tecnologias de captura de gás carbônico de fontes energéticas

Sílvio Vaz Jr.¹

Ana Paula Rodrigues de Souza²

Bruno Eduardo Lobo Baeta³

Resumo – O gás carbônico (CO₂), ou dióxido de carbono, é um gás gerado tanto por fontes naturais quanto por fontes antrópicas, como a agricultura e a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia. Na atualidade, ele é visto como o principal contribuinte para o aumento do efeito estufa, levando ao aquecimento global. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias de captura e uso desse gás são de grande importância para a mitigação dos gases do efeito estufa (GEE) e redução de seus efeitos ambientais negativos. Neste Boletim são apresentados e discutidos os resultados obtidos do levantamento bibliométrico para posicionamento do Brasil frente às tecnologias de captura de dióxido de carbono de fontes energéticas. Tal levantamento foi precedido de uma revisão bibliográfica crítica das tecnologias de captura atualmente em desenvolvimento. Desse modo, foi possível observar que o Brasil está aquém de países como China e Estados Unidos, os quais são líderes em pesquisas no tema.

Termos para indexação: aquecimento global, gases do efeito estufa, captura química, precificação de carbono.

¹ Químico, doutor em Química Analítica, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

² Engenheira sanitária, mestranda do programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental (Proamb) da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

³ Químico, doutor em Engenharia Ambiental, professor e coordenador do programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental (Proamb) da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Bibliometric survey of technologies for capturing carbon dioxide from energy sources

Abstract – Carbon dioxide (CO₂) is a gas generated by both natural and man-made sources, such as agriculture and the burning of fossil fuels for power generation. Currently, it is seen as a major contributor to the greenhouse effect, leading to global warming. Therefore, the development of technologies to capture and use this gas are of great importance for the mitigation of greenhouse gases (GHG) and reduction of their negative environmental effects. This study presents and discusses the results obtained from the bibliometric survey for Brazil's positioning in relation to technologies for capturing carbon dioxide from energy sources. This survey was preceded by a critical literature review of the capture technologies currently under development. Thus, it was possible to observe that Brazil is behind countries like China and the United States, which are leaders in research on the subject.

Index terms: global warming, greenhouse gases, chemical capture, carbon pricing.

Introdução

O dióxido de carbono (CO_2), ou gás carbônico, é um gás formado por dois átomos de oxigênio (O) e um átomo de carbono (C) por meio de dupla ligação (Figura 1), possui caráter polar e uma geometria linear de sua molécula, $\text{O}=\text{C}=\text{O}$, sendo solúvel em água, com a formação de ácido carbônico (Kotz, 2015; Pubchem, 2021). Oriundo de processos naturais – produzido durante a respiração por todos os animais, fungos e microrganismos que dependem direta ou indiretamente de plantas vivas ou em decomposição para se alimentar – e de atividades antrópicas, principalmente dos processos de combustão que utilizam combustíveis fósseis, o gás carbônico é considerado um gás com potencial de uso como matéria-prima (Poliakoff et al., 2015). Quanto às suas aplicações comerciais, podem-se destacar: uso como solvente para extração por fluido supercrítico, agente vasodilatador, anestésico, antagonista, gás para embalagem de alimentos, propelente de alimentos, gás para refrigerante, além de metabólito da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, utilizada na produção de etanol. As principais propriedades físico-químicas da sua molécula são apresentadas na Tabela 1.

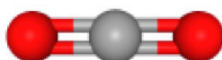


Figura 1. Estrutura química da molécula de dióxido de carbono. Oxigênio em vermelho e carbono em cinza.

Fonte: Pubchem (2021).

Tabela 1. Propriedades físico-químicas da molécula de dióxido de carbono.

Nome da propriedade	Valor da propriedade
Massa molecular	44,009 g mol ⁻¹
Aceptores de ligação de hidrogênio	2
Massa molecular exata	43,989829 g mol ⁻¹
Massa molecular monoisotópica	43,989829 g mol ⁻¹
Área superficial topológica polar	34,1 Å ²
Carga formal	0
Unidade covalentemente ligada	1

Fonte: adaptado de Pubchem (2021).

Para um melhor entendimento do potencial de utilização desse gás, para a promoção de uma descarbonização de processos industriais e agroindustriais, especialmente os de geração de energia, devem ser considerados aspectos diversos, como os termodinâmicos e cinéticos, a viabilidade técnico-econômica dos projetos e tecnologias, a integração de processos, a sustentabilidade e os princípios de química verde.

Sabe-se que a emissão de gases do efeito estufa (GEE) ocorre por meio de fontes naturais, mas uma significativa parcela dessas emissões é de origem antrópica – para a qual o gás carbônico é tido como o principal contribuinte. Tais gases produzem alterações climáticas em escala global, com efeitos ambientais adversos.

Eventos como o aquecimento global em decorrência do efeito estufa se apresentam como valiosa justificativa para as buscas por tecnologias que amenizem as consequências da poluição atmosférica.

O objetivo de um levantamento bibliométrico é posicionar os principais desenvolvimentos tecnológicos em um determinado tema de PD&I, como a captura de gás carbônico. Para este caso, sua extensão é delimitada de forma a embasar a composição e concentração dos resíduos gasosos de chaminés de plantas termoelétricas e de usinas de etanol e apresentar as principais tecnologias de captura disponíveis no mercado. O levantamento justifica-se pela necessidade de novas tecnologias que mitiguem as emissões descontroladas de gás carbônico, contribuindo para a descarbonização dos vários setores que compõem a economia global.

Revisão bibliográfica

Antes de um levantamento bibliométrico, entendeu-se ser necessária uma revisão bibliográfica crítica a respeito do impacto do gás carbônico – a partir daqui chamado de dióxido de carbono – no aquecimento global e das principais tecnologias de captura em desenvolvimento na atualidade.

Aquecimento global

Com o crescimento industrial, as emissões de poluentes gasosos ganharam força. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018), são emitidas aproximadamente 41 bilhões de toneladas de dióxido de carbono anualmente que contribuem para um aumento na temperatura do planeta. Devido a isso, o aquecimento global, provocado pelas emissões descontroladas dos gases causadores do efeito estufa (ex.: dióxido de carbono, metano e óxido nitroso), é objeto de pesquisa científica, de políticas ambientais e de conscientização da sociedade moderna.

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente na atmosfera terrestre. É um fenômeno primordial para a existência de vida no planeta, pois atua como uma manta recebendo energia solar para manter a temperatura média global (Kweku et al., 2017). O efeito estufa evita que o calor que volta para a atmosfera se perca para o espaço. Sem essa condição, a terra teria uma temperatura tão baixa a ponto de não haver condições adequadas para a vida terrestre (United Kingdom, 2011).

Por sua vez, o aquecimento global ocorre pela presença massiva de gases na atmosfera que retêm calor além do necessário para a manutenção da terra (Kweku et al., 2017).

De acordo com Schultheis (2016), os gases do efeito estufa (GEE), majoritariamente dióxido de carbono, óxido nitroso e metano, possuem uma estrutura molecular capaz de absorver determinada quantidade de calor, e é essa capacidade que configura tal efeito. Se a concentração de moléculas desses gases for elevada, a manta de proteção da terra fica sobrecarregada de calor, provocando o aquecimento global. A contribuição percentual ao efeito estufa se dá do seguinte modo (Falci, 2019):

- Dióxido de carbono: 53%
- Metano: 17%
- CFCs (clorofluorcarbonos): 12%
- Óxido nitroso: 6%
- Outros: 12%

A grande quantidade de GEE emitidos para a atmosfera por meio de atividades industriais e agroindustriais – como a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia em termelétricas e a fermentação de sacarose para a produção de etanol em usinas de cana-de-açúcar –, podem promover

o efeito estufa por possibilitarem uma maior absorção da radiação infravermelha do espectro eletromagnético. Desse modo, os processos antrópicos são considerados aqueles que estão intensificando o aquecimento global (Kumar et al., 2018).

Sendo o aquecimento global um assunto de interesse econômico, social e ambiental de grande relevância, a maioria dos países tem direcionado grandes ações para mitigação dos GEE (Lin; Xu, 2018).

Cabe destacar a importância do entendimento, monitoramento e controle das mudanças climáticas, especialmente do aquecimento global, o que pode ser refletido na organização de grandes convenções mundiais sobre o tema, como o Acordo de Paris⁴, Rio +20⁵ e Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas⁶, as quais visam unir esforços e estabelecer ações e políticas internacionais de redução de emissão de GEE.

Fontes de emissão dos GEE

De acordo com Heek et al. (2017), as principais atividades emissoras de GEE são:

- A geração de energia em usinas que usam combustíveis fósseis como carvão mineral, gás natural e petróleo.
- O tráfego e transporte.
- A agricultura.
- As indústrias de manufatura e construção.

Tajudin et al. (2019) ressaltam que o notável aumento de indústrias e de automóveis em áreas urbanas caracteriza a principal causa da emissão desenfreada de poluentes como o monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de carbono (CO₂). Antony et al. (2018) observaram que a indústria química é o setor que mais contribui para a geração de poluentes gasosos, sendo desejável o desenvolvimento de processos sustentáveis de transformação.

⁴ Disponível em: <https://news.un.org/pt/tags/acordo-de-paris>.

⁵ Disponível em: http://www.rio20.gov.br/sobre_a_rio_mais_20.html.

⁶ Disponível em: <https://unfccc.int/>.

A emissão de GEE teve seu crescimento global acelerado a partir da primeira revolução industrial, em meados do século XIX. A necessidade da queima de combustíveis fósseis para obter energia, por exemplo, é responsável por $\frac{3}{4}$ da emissão de dióxido de carbono na atmosfera (Khapre et al., 2020), sendo este o setor que mais contribui para liberação do gás. Em seguida, tem-se mudança de uso da terra, com desmatamentos descontrolados e mau uso de madeiras e afins. Sabendo-se que as usinas termoelétricas estão incluídas no setor que mais contribui com as emissões de poluentes gasosos, é pertinente agregar esforços para o desenvolvimento de tecnologias mitigadoras de GEE para essas usinas.

No setor da agroindústria, mais especificamente na produção de etanol, Paulo (2019) destaca como as principais emissões gasosas dessa atividade dióxido de carbono, vapor d'água, material particulado e dióxido de nitrogênio.

O dióxido de carbono provém, principalmente, de atividades como a combustão e a mudança de uso das florestas (Sistema de Estimativa de Emissão de Gases, 2017) e é usado como meio de referência para os outros gases quando se consideram seus potenciais de influência no aquecimento global. Por exemplo, o óxido de nitrogênio (N_2O) resultante, principalmente, da combustão possui um poder de aquecimento global 310 vezes maior que o dióxido de carbono (Braga et al., 2007). Já o metano, que é produzido por atividades como a decomposição da matéria orgânica, sendo emitido, geralmente, em aterros sanitários e lixões, apresenta poder de aquecimento global 21 vezes maior que o dióxido de carbono (Brasil, 2018).

O dióxido de carbono é considerado o GEE que mais contribui para o aquecimento global, principalmente devido a um aumento de 35% na sua emissão após o início da era industrial, sendo a sua emissão no Brasil no ano de 2019 de 2,17 bilhões de toneladas brutas de gás carbônico equivalente (CO_2e) (Brasil, 2018). Trata-se de 3,2% do total mundial, o que mantém o Brasil como o sexto maior emissor desse gás no planeta (Sistema de Estimativa de Emissão de Gases, 2020).

De acordo com o GWP100 (*100-year Global Warming Potential*), conforme documento do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014a), referência utilizada nos cálculos de descarbonização, os impactos relativos de diferentes gases na temperatura global são:

- $\text{CO}_2 = 1$
- CH_4 fóssil = 30
- CH_4 biogênico = 28
- $\text{N}_2\text{O} = 265$

Plantas termoeleétricas e usinas de etanol como fontes de CO_2

A geração de eletricidade fóssil é o setor que mais contribui para a poluição do ar, respondendo por 17% desse aporte (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014b). As plantas termoeleétricas, em sua predominância, geram energia por meio da queima de combustíveis fósseis não renováveis – como o carvão mineral e o diesel.

Devido aos impactos ambientais causados por essa geração não renovável de energia, alternativas de substituição por gás natural, energia nuclear, hidrelétricas e tecnologias que minimizem os impactos são amplamente estudadas (World Health Organization, 2016). Entretanto, muitas dessas alternativas dependem de viabilidade técnica e de viabilidade econômica, o que varia conforme o país e as suas condições naturais. Esse impasse faz requerer tecnologias que reduzam as emissões gasosas das plantas existentes, apesar de a concentração do dióxido de carbono emitido ser de, aproximadamente, 8% v/v⁷.

A produção de etanol se apresenta como alternativa de mitigação em relação a outros processos agroindustriais, já que o gás emitido poderia, em tese, ser absorvido na sua totalidade pelas plantas cultivadas (ex.: cana-de-açúcar) por meio da fotossíntese. Como subprodutos da fermentação da sacarose para a produção do etanol, tem-se calor e dióxido de carbono. Além de mais uma alternativa para reduzir as emissões de GEE por meio do uso como biocombustível, a produção do etanol gera um dióxido de carbono com 99% v/v de pureza (Zhang et al., 2017), o que é muito desejável para o uso do dióxido de carbono como matéria-prima industrial. Devido ao elevado teor de pureza do gás, a viabilidade da sua captura torna-se mais significativa por permitir tecnologias de captura de menor custo (Silva et al., 2018).

⁷ Valor determinado pelo projeto de pesquisa Agricarbono (Eletrobras CGTEE-Embrapa-Programa de P&D Aneel) em 2019.

Tecnologias de captura de CO₂

Considerado o principal causador do aquecimento global, o dióxido de carbono apresenta-se como tema de grande interesse acadêmico e industrial. Mikayilov et al. (2018) afirmam que o número de atividades emissoras desse gás tende a crescer futuramente e salientam que não só os países possuidores das grandes economias devem adotar as medidas de redução, mas os demais países também devem empregar as políticas ambientais destinadas à sua mitigação.

Para tratar do controle das emissões de dióxido de carbono, diversas pesquisas encontram-se em execução visando à mitigação desse gás. Ghanbaralizadeh et al. (2016) ressaltam que o seu uso pode ser dividido em quatro categorias:

- 1) Produção química (ex.: matéria-prima de polímeros e carbonatos).
- 2) Produção de combustíveis (ex.: matéria-prima de gasolina e diesel).
- 3) Aproveitamento biológico (ex.: fonte de C para crescimento de microalgas).
- 4) Utilização convencional (ex.: solvente).

Souza (2016) cita como processos de mitigação de dióxido de carbono: uso mais eficiente da energia, substituição dos combustíveis fósseis por outros com menor conteúdo de carbono, utilização de soluções energéticas que empreguem fontes de energia renováveis e armazenamento do dióxido de carbono em formações geológicas.

Entre as alternativas de mitigação do dióxido de carbono, o seu uso como matéria-prima representa uma opção de grande apelo econômico e ambiental, pois permite a sua utilização como insumo em processos industriais, podendo colaborar na formação de produtos e materiais inovadores (Heek et al. 2017). Características como abundância, baixa toxicidade e baixo custo, fazem do dióxido de carbono uma excelente matéria-prima (Antony et al., 2018).

Visando à sua utilização industrial, as tecnologias se direcionam a capturar esse gás da maneira mais pura, econômica e ambientalmente viável. As principais tecnologias de captura referem-se à adsorção, absorção, captura por membranas e captura (Wilcox, 2012). A captura de dióxido de carbono

pode ser realizada durante três etapas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005):

- Pré-combustão
- Combustão
- Pós-combustão

Adsorção

No processo de adsorção, o gás entra em contato com partículas porosas capazes de adsorverem o gás devido à sua afinidade superficial (ex.: grupos químicos semelhantes), separando-o da mistura de gases (Wilcox, 2012). A Tabela 2 apresenta exemplos de tecnologias em desenvolvimento para promover a adsorção.

Tabela 2. Trabalhos que representam as tendências de pesquisa para a adsorção.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>In-situ capture and conversion of atmospheric CO₂ into nano-CaCO₃ using a novel pathway based on deep eutectic choline chloridecalcium chloride</i>	Karimi et al. (2018)	Neste estudo, a captura de CO ₂ é realizada a partir de uma solução de solventes com base de cloreto de colina eutético e tem a finalidade de tornar o CO ₂ um precursor útil para a produção de nanopartículas de calcita com valor agregado. Os resultados apresentam viabilidade para que o precursor seja aplicado em grande escala, reduzindo as emissões de CO ₂ e demonstrando a eficiência da solução para o processo de adsorção.
<i>Enhancement of CO₂ capture by using synthesized nano-zeolite</i>	Pham et al. (2016)	Esta pesquisa trata da aplicação de nanozeólita no processo de captura de CO ₂ por adsorção, com base na temperatura empregada. Foram realizadas simulações que variaram parâmetros como porcentagem do adsorvente, de CO ₂ capturado e temperatura, mantendo a captura de CO ₂ acima de 88% v/v, tendo-se como resultados: alta eficiência da nanozeólita, além da economia produzida pelo adsorvente.

Continua...

Tabela 2. Continuação.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>Development of carbon-based vacuum, temperature and concentration swing adsorption post-combustion CO₂ capture processes</i>	Plaza e Rubiera (2019)	Este trabalho trata da adsorção a vácuo, temperatura e concentração em uma usina termoeletrica (UT) de carvão. Considera-se o principal impedimento desta tecnologia o gasto energético. Para que fosse possível avaliar os parâmetros empregados durante a pesquisa, dois cenários foram estabelecidos, e o principal resultado referiu-se à taxa de calor específica que se apresentou como vantagem em relação à utilização de aminas convencionais.

Os processos de adsorção são considerados processos de separação complexos. As pesquisas que visam minimizar os custos desses processos apresentam, hoje, algumas limitações, entre elas a baixa eficiência no processo de separação do gás (Karimi et al., 2018). Outro fator limitante no desenvolvimento de tecnologias de adsorção é a necessidade de grandes quantidades de energia para operar o processo – ou seja, o balanço energético é desfavorável.

Absorção

Na absorção o processo deve ocorrer de maneira com que o dióxido de carbono seja passível de separação posterior, pós-captura. Isso é possível, pois essa tecnologia conta com materiais capazes de absorver o gás e transportá-lo de uma fase para outra. Nesse caso o gás carbônico é solubilizado, passando para a fase líquida da mistura, de forma a viabilizar a sua separação dos demais componentes (Wilcox, 2012).

A absorção está entre as tecnologias mais promissoras pela sua eficiência e viabilidade econômica. Entretanto, e como já citado, também o seu gasto energético durante o processo é elevado (Silva et al., 2018). Devido a isso, as pesquisas estão voltadas a otimizar a energia necessária para a operação. Na Tabela 3 são mostrados exemplos de tecnologias em desenvolvimento para promover a absorção.

Tabela 3. Trabalhos que representam as tendências das pesquisas sobre a absorção.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>Results from a pilot plant using un-promoted potassium carbonate for carbon capture</i>	Quyn et al. (2013)	Este trabalho teve como objetivo estudar a captura de CO ₂ por absorção utilizando o carbonato de potássio como solvente. Foram analisadas as especificidades do processo a partir da incorporação do solvente escolhido. Para traçar os parâmetros de simulação, utilizou-se o <i>software</i> Aspen® e foram estabelecidas porcentagens do solvente para avaliar cenários. Os autores consideraram os resultados como promissores para prever o desempenho do carbonato de potássio no processo de absorção.
<i>Use of frothers to improve the absorption efficiency of dilute sodium carbonate slurry for post combustion CO₂ capture</i>	Valluri e Kawatra (2021)	Neste trabalho, foi realizado estudo em escala piloto de 4 tipos de solvente para a captura de CO ₂ por absorção. Durante os ensaios, os autores incorporaram um surfactante a fim de avaliá-lo e também material espumante. O principal resultado dos ensaios referiu-se à eficiência da absorção pelos solventes que tiveram os espumantes incorporados no processo. A eficiência de captura no cenário em questão aumentou de 55% a 99%. A viabilidade dessa otimização apresentou baixo custo, além de ser ambientalmente adequada.
<i>Experimental investigation on absorption performance of nanofluids for CO₂ capture</i>	Devakki e Thomas (2020)	Nesta pesquisa foram estudados nanofluidos como absorventes de CO ₂ . Os nanofluidos utilizados foram os de TiO ₂ e Al ₂ O ₃ . Os principais objetivos dessa pesquisa foram observar os tipos de nanopartículas e a influência de suas concentrações no processo de absorção. O resultado mostrou que o aumento da concentração desses nanofluidos diminuiu o índice de absorção relativa do CO ₂ . Para realizar a comparação, utilizou-se um fluido de base. Também foram testados os nanofluidos à base de solução salina, em que se constatou que essa combinação diminuiu a estabilidade das nanopartículas, reduzindo a eficiência da absorção.

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>CO₂ absorption rate and capacity of semi-aqueous piperazine for CO₂ capture</i>	Yuan e Rochelle (2019)	Esta pesquisa estudou um dos solventes mais usados nas tecnologias de absorção de CO ₂ , a piperazina. Combinações com água e outro solvente foram realizadas para avaliar a piperazina quanto à sua precipitação. A precipitação desse composto influencia na eficiência da absorção do gás e, por isso, tem-se o interesse nas suas propriedades. Os resultados mostraram que, devido à incorporação de novos compostos, aumentou-se a capacidade de captura de CO ₂ e a capacidade de reciclagem do absorvente.

Separação por membranas

A captura por membranas baseia-se na seletividade do seu material constituinte em relação ao gás. O dióxido de carbono permeia-se pelas membranas, separando-se de outros compostos. Devido a sua função, as membranas dependem de parâmetros como permeabilidade do meio, tamanho de partícula, seletividade e volume de poros (Nocito; Dibenedetto, 2019). A Tabela 4 mostra os principais direcionamentos das pesquisas dessa tecnologia, segundo a literatura.

Tabela 4. Trabalhos que representam as tendências de pesquisa em separação por membranas.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>Hybrid membrane process for post-combustion CO₂ capture from coal-fired power plant</i>	Ren et al. (2020)	Esta pesquisa é direcionada à avaliação da seletividade de membranas híbridas que atuam no processo de captura de CO ₂ e N ₂ (que também é um gás do efeito estufa) em usinas termoeletricas (UT). Utilizou-se neste trabalho o <i>software</i> Aspen® para simular uma UT, e otimizaram-se parâmetros econômicos da tecnologia por membranas, permeabilidade e vida útil. O resultado apresentou fatores de causalidade entre o desenho da UT e as propriedades das membranas, além de identificar a seletividade da membrana e variáveis de custos.
<i>CO₂ capture by modified hollow fiber membrane contactor: Numerical study on membrane structure and membrane wettability</i>	Abdollahi-Mansoorkhani; Seddighi (2020)	Neste trabalho, os autores pesquisaram características de membranas a serem usadas para capturar CO ₂ de fonte de gás natural. Foi usado um modelo matemático para estudar elementos como molhabilidade da membrana, estrutura, tipo de absorvente usado no processo de captura, porosidade e tamanho de fibras. As simulações foram realizadas com quatro tipos de absorventes, tamanhos variados de fibras; porcentagens foram definidas para estimar os valores mais eficientes, com o intuito de definir a membrana ideal. Os resultados apresentados mostraram que concentração do absorvente, densidade e porosidade influenciaram diretamente na separação do CO ₂ .

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>Mass transfer characteristics of a continuously operated hollow-fiber membrane contactor and stripper unit for CO₂ capture</i>	Nieminen et al. (2020)	O foco deste trabalho foi avaliar a transferência de massa de um contator de membrana de fibra oca. Os parâmetros que influenciaram diretamente no coeficiente da transferência de massa foram explorados a fim de tornar visível a eficiência do contator quando ligado à membrana. A partir dos ensaios pôde-se observar a trabalhabilidade do contator utilizado. Este apresentou muitas limitações quanto à dessorção. Assim, sugeriu-se que ensaios a vácuo se apresentaram ineficientes, sendo necessário o umedecimento das membranas, a fim de facilitar a transferência de massa por elas.
<i>Membrane gas-solvent contactor pilot plant trials for post-combustion CO₂ capture</i>	Scholes et al. (2020)	Nesta pesquisa, tratou-se de um teste de absorção realizado em uma planta-piloto de geração de energia a partir de carvão mineral. Aqui, os autores utilizaram contadores gás-solvente com a finalidade de promover maior eficiência e compacidade no processo de captura de CO ₂ por meio da tecnologia de captura por membranas híbridas. Os contadores puderam auxiliar os solventes no processo de absorção do gás. Como resultado, os contadores se mostraram eficientes ao serem aplicados em escala industrial.

As pesquisas voltadas para a captura de dióxido de carbono por membranas têm como maior desafio o desenvolvimento de sistemas que otimizem os parâmetros necessários ao processo de captura. Entretanto, segundo Wilcox (2012), essa tecnologia é considerada a tecnologia mais eficaz entre as já existentes.

Definir a tecnologia de captura, bem como todas as operações unitárias envolvidas no processo, é de fundamental importância e ditará a sua viabilidade de aplicação. Novamente, segundo Wilcox (2012), os métodos de separação de gases envolvendo membranas apresentam melhores resultados.

A principal discussão levantada pelos processos de captura é relacionada aos fatores econômicos envolvidos – Capex (*capital expenditure*) e Opex (*operational expenditure*). Sabe-se que tecnologias verdes requerem alto índice de aperfeiçoamento e, geralmente, estão atreladas a altos investimentos (Kalatjari et al., 2019).

Captura química

Entre as tecnologias de captura de dióxido de carbono atualmente em desenvolvimento, tem-se ainda a captura química para a geração de carbonatos, como aquela que pode promover uma agregação de valor às cadeias industriais e agroindustriais, além de levar a sistemas de produção mais sustentáveis. Essa captura faz uso de reações químicas tendo-se o dióxido de carbono como reagente e os carbonatos como os produtos finais – esses podem ser inorgânicos ou orgânicos. A Tabela 5 exhibe trabalhos que envolvem a captura de dióxido de carbono para a produção de carbonatos.

Tabela 5. Trabalhos que representam as tendências de pesquisa em captura química.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>Experimental investigation of the carbonation reactor in a tail-end calcium looping configuration for CO₂ capture from cement plants</i>	Hornberger et al. (2020)	Neste trabalho foi investigada a captura de CO ₂ por meio da tecnologia de circuito (<i>looping</i>) de cálcio. A pesquisa foi conduzida em escala semi-industrial em usinas termoeletricas com queima de combustíveis fósseis. Os resultados mostraram que maiores concentrações de solvente aumentam o transporte de gás. Os ensaios validaram a tecnologia empregada para capturar CO ₂ para aplicação em usinas de fabricação de cimento.

Continua...

Tabela 5. Continuação.

Título do trabalho	Citação	Resumo
<i>Captura de CO₂ utilizando o processo Ca-Looping com CaO e Al₂O₃</i>	Silva e Santos (2018)	Visando otimizar a tecnologia de Ca-Looping, este trabalho investigou a utilização de aditivos com o intuito de diminuir a desativação de CaO durante o processo de captura de CO ₂ . Os resultados obtidos mostraram que as combinações de carbonatos com Al ₂ O ₃ , aditivo usado nesse experimento, foram eficazes na captura de CO ₂ , pois impediu o fechamento de poros e o crescimento de cristais de CaO.
<i>Captura de dióxido de carbono utilizando óxidos a base de cálcio</i>	Bisinoti et al. (2017)	Este trabalho teve como objetivo avaliar a incorporação de óxido de cálcio ao processo de captura de CO ₂ por carbonatação. Duas combinações de carbonatação foram feitas: uma com cálcio puro e outra com cálcio misturado com alumina. Constatou-se que a carbonatação com o cálcio puro promoveu maior captura de CO ₂ do que a mistura com alumina, que se demonstrou pouco eficiente ao processo de captura de CO ₂ como carbonato.
<i>Single-step, low temperature and integrated CO₂ capture and conversion using sodium glycinate to produce calcium carbonate</i>	Liu e Gadikota (2020)	Este trabalho estudou a captura e conversão de CO ₂ para produzir carbonato de cálcio com CaO e CaSiO ₃ como precursores. Usou-se glicinato de cálcio para promover a captura de CO ₂ e investigaram-se parâmetros como a temperatura, concentração do aditivo e tempo de reação. Os resultados obtidos sugeriram que o glicinato sofre múltiplos ciclos de capturas e regeneração, favorecendo a precipitação de carbonatos.

O grande interesse nessa classe de tecnologia se dá porque os carbonatos obtidos possuem elevado ponto de ebulição, baixa toxicidade e são biodegradáveis (North et al., 2010). Mais do que se pensar em mitigar o dióxido de carbono, a sua captura como carbonato visa à utilidade do gás como insumo para setores industriais, como o químico.

Mercado de carbono

Com o agravamento das mudanças climáticas, os mecanismos de controle de poluição voltam-se mais ainda para a mitigação das emissões dos GEE. Kim e Park (2018) defendem que os mecanismos criados em convenções mundiais, como o Protocolo de Quioto⁸, se dão essencialmente pelo aumento de emissões de GEE, especialmente de dióxido de carbono. Assim, a preocupação mundial com as emissões desse gás vai além do aquecimento global, ganhando um enfoque econômico e social.

O mercado de carbono compreende acordos feitos em convenções mundiais por diversos países com o objetivo de fomentar e impulsionar as buscas por processos mitigadores e, também, de proporcionar a união desses acordos visando uma conscientização das reduções dos GEE (Godoy, 2013).

Como forma de incentivar a redução dos GEE, esse mercado permite transações de carbono entre países que não atingiram sua cota de redução e aqueles que a superaram, com essas transações gerando receitas para quem possui créditos de carbono (Anand et al., 2021), tornando-as de grande interesse econômico e social.

Entender a viabilidade econômica do mercado do dióxido de carbono auxiliará a estimar, de forma mais exata, as emissões antrópicas desse gás. Com o passar dos anos, as mudanças climáticas promoverão efeitos mais agressivos, sendo o mercado de carbono um estímulo para que os países cumpram os acordos feitos nas convenções internacionais (Organización Mundial de la Salud, 2018), além de fomentar as pesquisas de redução e/ou aproveitamento dos GEE.

Na atualidade, os sistemas de precificação de carbono abrangem, principalmente, setores industriais, de energia e mudança do uso da terra. São exemplos de esforços internacionais para a precificação:

- *The Partnership for Market Readiness (PMR)*⁹
- *The Carbon Pricing Leadership Coalition (CPLC)*¹⁰

⁸ Disponível em: <https://ipam.org.br/entenda/o-que-e-o-protocolo-de-quioto/>

⁹ Disponível em: <https://www.thepmr.org/>.

¹⁰ Disponível em: <https://www.carbonpricingleadership.org/>.

- *The Mitigation Action Assessment Protocol (MAAP)*¹¹

No Brasil, os setores termoeletrônicos e sucroalcooleiros são objetos de pesquisa por serem grandes geradores de dióxido de carbono. Cabe destacar a pureza desse gás produzido pelo setor sucroalcooleiro, o que o torna mais facilmente *monetizável*, quando comparado àquele advindo do setor termoeletrônico, cuja pureza é consideravelmente reduzida – conforme tratado no item “Fontes de emissão dos GEE”. Como exemplo da precificação de carbono, pode-se citar a comercialização de créditos de carbono em bolsa de valores: a B3 – Bolsa Brasil Balcão – registra as emissões feitas por produtores e importadores de biocombustíveis, negocia e solicita a aposentadoria do Crédito de Descarbonização (CBIO) no Brasil (Brasil Bolsa Balcão, 2021).

Metodologia do levantamento bibliométrico

Para a elaboração do levantamento bibliométrico, foi realizada a busca em bases de dados por meio de palavras-chaves elencadas ao tema principal, que é a captura de dióxido de carbono. O intervalo de tempo delimitado foi de 2018 a 2020. Sendo o objeto de estudo tratado há décadas, discussões mais antigas foram consideradas a fim de comparar as primeiras tecnologias com as tecnologias atuais.

Uma vez que o número de palavras-chaves nas bases de dados é limitado, foram realizadas combinações entre elas. As bases de dados utilizadas foram:

- *Scopus*.
- *Web of Science*.
- *Science Direct*.
- *Google Scholar*.
- *Education Resources Information Center (ERIC)*.

As palavras-chaves utilizadas para realizar as buscas foram:

- CO₂.

¹¹ Disponível em: <https://maap.worldbank.org/#/homepage>.

- *Capture.*
- *Storage.*
- *Carbonates.*
- *Thermochemistry.*
- *Thermoelectric.*
- *Ethanol plant.*
- *Greenhouse gases.*
- *Global warming.*
- *Carbon credits.*

As seguintes combinações de palavras-chaves foram realizadas de modo a focar a busca:

- 1) *Greenhouse gases, CO₂, global warming* (combinação 1).
- 2) *Greenhouse gases, CO₂, capture, storage* (combinação 2).
- 3) *CO₂, capture, thermochemistry* (combinação 3).
- 4) *CO₂, capture, ethanol plant* (combinação 4).
- 5) *CO₂, capture, carbonates* (combinação 5).
- 6) *Carbon credits, global warming, greenhouse gases* (combinação 6).

Para ilustrar as buscas, foram utilizados gráficos gerados na plataforma Scopus quanto à quantidade de trabalhos por país, para cada uma das seis combinações de palavras-chaves para o período de 2018 a 2020.

Resultados e discussão

Os resultados a seguir foram originados na plataforma Scopus, pois esta base de dados se apresentou mais completa em relação às demais. O principal objetivo dessa análise de dados foi demonstrar a importância de pesquisas voltadas à mitigação de dióxido de carbono, especialmente por meio de tecnologias de captura.

A Figura 2 apresenta a quantidade de pesquisas por país ao utilizar a combinação 1, conforme metodologia descrita.

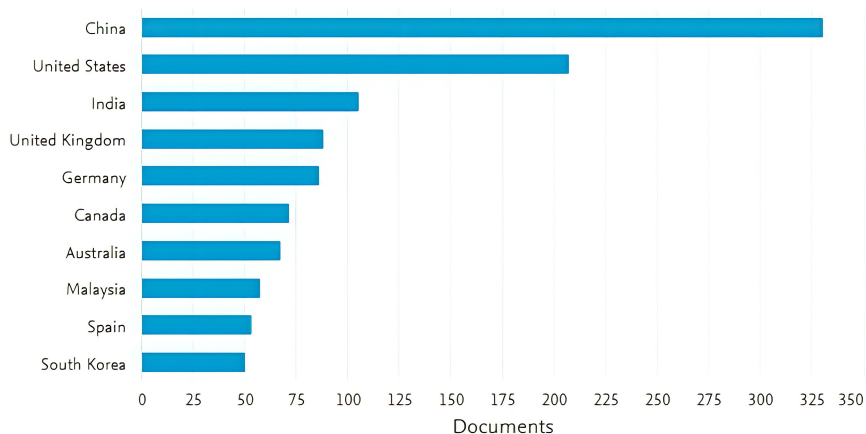


Figura 2. Os 10 países que mais pesquisam o tema de acordo com a combinação 1 “*Greenhouse gases, CO₂, global warming*” e suas respectivas quantidades de documentos.

A Figura 3 apresenta a quantidade de pesquisas por país ao utilizar a combinação 2, conforme metodologia descrita.

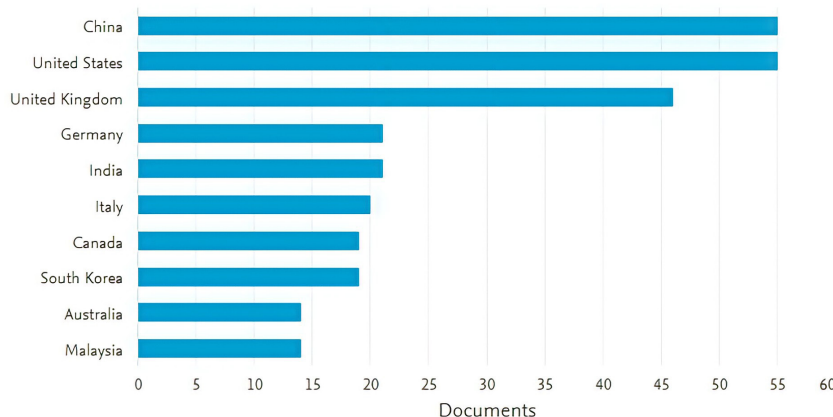


Figura 3. Os 10 países que mais pesquisam de acordo com a combinação 2 “*Greenhouse gases, CO₂, capture, storage*” e suas respectivas quantidades de documentos.

A Figura 4 apresenta a quantidade de pesquisas por país ao utilizar a combinação 3, conforme metodologia descrita.

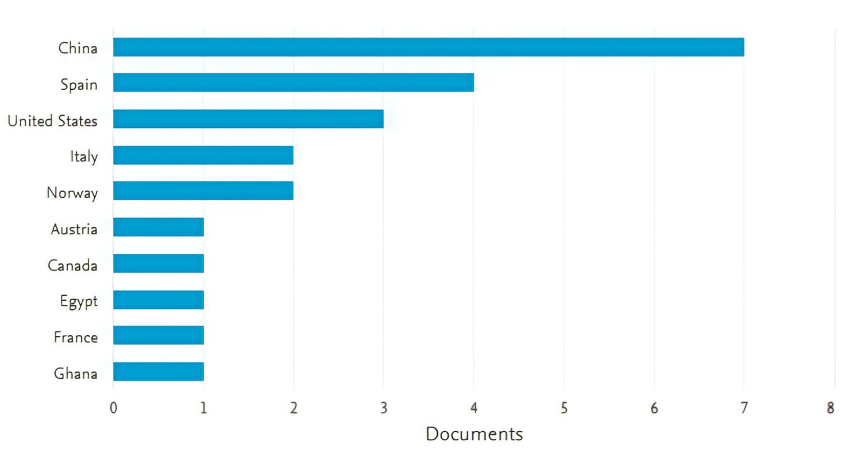


Figura 4. Os 10 países que mais pesquisam de acordo com a combinação 3 “CO₂, capture, thermochemical” e suas respectivas quantidades de documentos.

A Figura 5 apresenta a quantidade de pesquisas por país ao utilizar a combinação 4, conforme metodologia descrita.

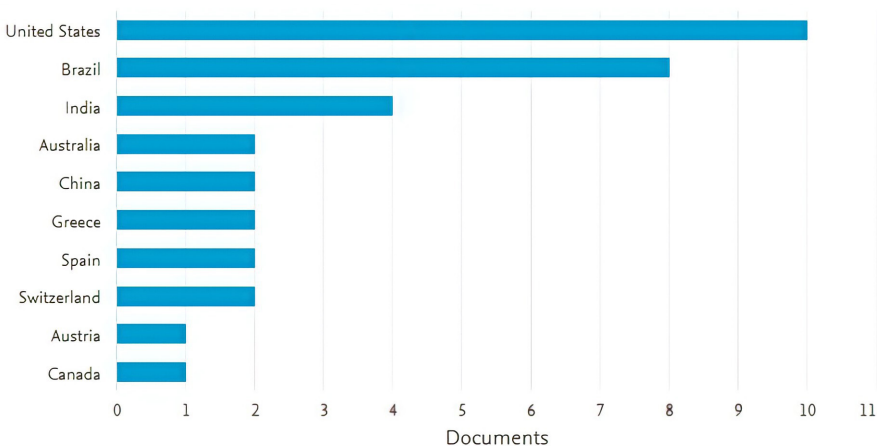


Figura 5. Os 10 países que mais pesquisam de acordo com a combinação 4 “CO₂, capture, ethanol plant” e suas respectivas quantidades de documentos.

A Figura 6 apresenta a quantidade de pesquisas por país ao utilizar a combinação 5, conforme metodologia descrita.

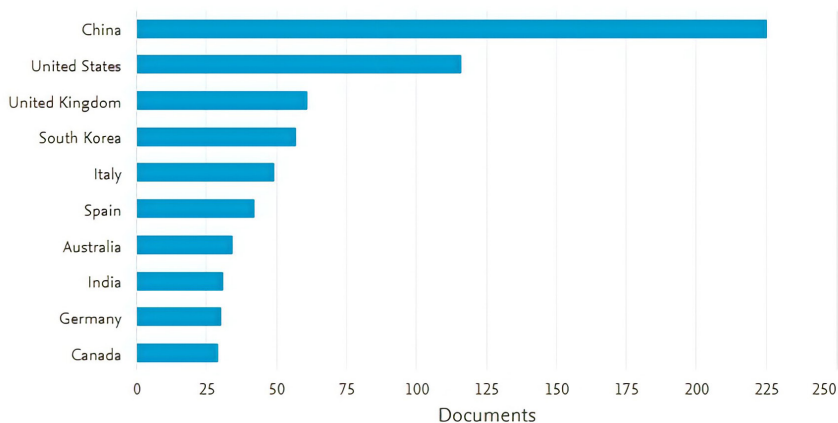


Figura 6. Os 10 países que mais pesquisam de acordo com a combinação 5 “CO₂, capture, carbonate” e suas respectivas quantidades de documentos.

A Figura 7 apresenta a quantidade de pesquisas por país ao utilizar a combinação 6, conforme metodologia descrita.

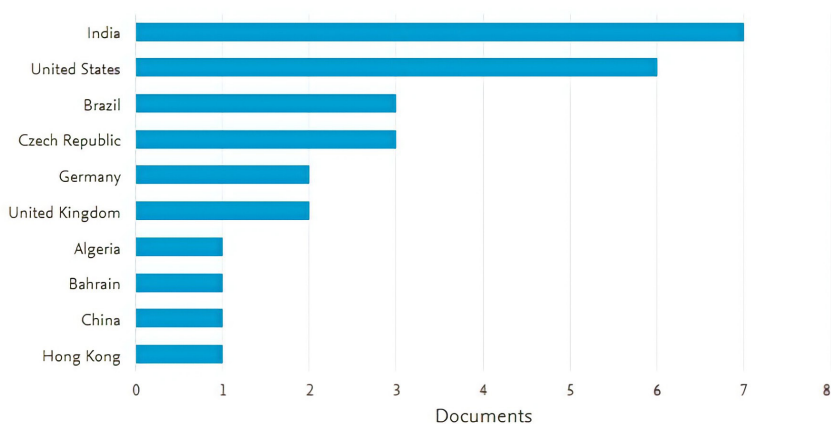


Figura 7. Os 10 países que mais pesquisam de acordo com a combinação 6 “Carbon credits, global warming, greenhouse gases” e suas respectivas quantidades de documentos.

A partir dos resultados obtidos para as diversas combinações, foi possível observar o protagonismo da China e dos Estados Unidos da América em pesquisas sobre GEE e tecnologias de captura de CO₂ (combinações de 1 a 5). De um modo geral, a China é a líder em P&D em novas tecnologias, exceto para o CO₂ gerado em usinas de etanol (combinação 4).

O Brasil ocupa a segunda e terceira posições quando se considera a captura de dióxido de carbono de usinas de etanol (combinação 4) e a comercialização de créditos de carbono (combinação 6), respectivamente. Tais posições indicam uma falta de projetos em PD&I para o desenvolvimento de novas tecnologias de captura de dióxido de carbono, além de refletir o reduzido apoio atual à ciência por parte do Estado.

Considerações finais

A revisão bibliográfica crítica se faz indispensável para o entendimento das tecnologias existentes para a captura de dióxido de carbono e, principalmente, da importância que a captura tem para a sociedade atual. Foram destacadas as principais tecnologias de captura a fim de facilitar o direcionamento de esforços e investimentos para a mitigação dos GEE de origem termoeletrônica e bioenergética. Ademais, observou-se que fatores econômicos e eficiência energética são os que mais requerem otimização.

O resultado do levantamento bibliométrico realizado nas bases de dados e as respectivas combinações das palavras-chaves tornaram possível o entendimento da necessidade de novas pesquisas e do aperfeiçoamento das tecnologias já existentes. Um ponto a ser destacado foi notar que o desenvolvimento de pesquisa abrange, de forma significativa, os cinco continentes. Entretanto, países desenvolvidos, como os Estados Unidos e em desenvolvimento, como a China, apresentaram maiores investimentos no tema. A partir das combinações de palavras-chaves, pôde-se observar que o Brasil apresenta um número de trabalhos significativamente inferior em relação aos países que mais pesquisam nesse setor, demandando maiores investimentos para o desenvolvimento de tecnologias próprias, apesar de já haver uma movimentação no que diz respeito ao mercado de carbono.

Referências

- ABDOLAH-MANSOORKHANI, H.; SEDDIGHI, S. CO₂ capture by modified hollow fiber membrane contactor: numerical study on membrane structure and membrane wettability. **Fuel Processing Technology**, v. 209, 2020. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106530.
- ANAND, N.; VAN DUIN, R.; TAVASSZY, L. Carbon credits and urban freight consolidation: an experiment using agent based simulation. **Research in Transportation Economics**, v. 85, article number 100797, Mar. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100797>.
- ANTONY, A.; RAMACHANDRAN, J. P.; RAMAKRISHNAN, R. M.; RAVEENDRAN, P. Sizing of paper with sucrose octaacetate using liquid and supercritical carbon dioxide as a green alternative médium. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 28, p. 306-312, 2018.
- BISINOTI, L. V.; SILVA, J. A.; SANTOS, J. B. O. Captura de dióxido de carbono utilizando óxidos a base de cálcio. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, v. 1, n. 4, 2017. DOI: 10.5151/chemeng-cobeqic2017-463.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2007. 336 p.
- BRASIL BOLSA BALCÃO. **Serviços de natureza informacional**. Disponível em: http://www.b3.com.br/pt_br/produtos-e-servicos/outros-servicos/servicos-de-natureza-informacional/credito-de-descarbonizacao-cbio/. Acesso em: 1 fev. 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **[Efeito estufa e aquecimento global]**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>. Acesso em: 5 nov. 2018.
- DEVAKKI, B.; THOMAS, S. Experimental investigation on absorption performance of nanofluids for CO₂ capture. **International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration**, v. 28, n. 2, article number 2050017, Jun. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1142/s2010132520500170>.
- FALCI, P. A. **Repesando práticas em educação ambiental: proposta de uma sequência didática**. 129 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Química em Rede Nacional) -- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- GHANBARALIZADEH, R.; BOUHENDIK, H.; KABIRI, K.; VAFAYAN, M. A novel method for toughening epoxy resin through CO₂ fixation reaction. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 16, p. 225-235, 2016.
- GODOY, S. G. M. Projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa: desempenho e custos de transação. **Revista de Administração**, v. 48, n. 2, p. 310-326, 2013.
- HEEK, J. V.; ARNING, K.; ZIEFLE, M. Reduce, reuse, recycle: Acceptance of CO₂-utilization for plastic products. **Energy Policy**, v. 105, p. 53-66, 2017.
- HORNBERGER, M.; MORENO, J.; SCHMID, M.; SCHEFFKNECHT, G. Experimental investigation of the carbonation reactor in a tail-end calcium looping configuration for CO₂ capture from cement plants. **Fuel Processing Technology**, v. 210, 106557, 2020. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106557.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva, 2014a. 151 p.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Energy systems. In: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014b. p. 511-597.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC special report on carbon dioxide capture and storage**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 442 p.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. In: INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. Geneva: World Meteorological Organization, 2018. 24 p.

KALATJARI, H. R.; HAGHTALAB, A.; NASR, M. R. J.; HEYDARINASAB, M. Experimental, simulation and thermodynamic modeling of an acid gas removal pilot plant for CO₂ capturing by mono-ethanol amine solution. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 72, Dec. 2019. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103001.

KARIMI, M.; JODAEI, A.; KHAJVANDI, A.; SADEGHINIKRAHIM, A.; JAHANDIDEH, R. In-situ capture and conversion of atmospheric CO₂ into nano-CaCO₃ using a novel pathway based on deep eutectic choline chloride-calcium chloride. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 516-522, 2018.

KHAPRE, A. S.; JAISWAL, A.; RENA, R.; KUMAR, S. Utilizing the greenhouse effect as a source to produce renewable energy. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**, v.3, p. 835-843, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11021-5.

KIM, J.; PARK, K. Effect of the clean development mechanism on the deployment of renewable energy: Less developed vs. well-developed financial markets. **Energy Economics**, v.75, p. 1-13, 2018. DOI: 10.1016/j.eneco.2018.07.034.

KOTZ, J. C. **Química geral e reações químicas**. 9. ed. [São Paulo]: Cengage Learning, 2015. v. 1, 864 p.

KUMAR, V.; NANDA, M.; JOSHI, H. C.; SINGH, A.; SHARMA, S.; VERMA, M. Production of biodiesel and bioethanol using algal biomass harvested from fresh water river. **Renewable Energy**, v. 116, part A, p. 606-612, 2018.

KWEKU, D. W.; BISMARCK, O.; MAXWELL, A.; DESMOND, K. A.; DANSO, K. B.; OTI-MENSAH, E. A.; QUACHIE, A. T.; ADORMAA, B. B. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. **Journal of Scientific Research & Reports**, v. 17, n. 6, p. 1-9, 2017. DOI : 10.9734/JSRR/2017/39630.

LIN, B., XU, M. Regional differences on CO₂ emission efficiency in metallurgical industry of China. **Energy Policy**, v. 120, p. 302-311, 2018.

LIU, M.; GADIKOTA, G. Single-step, low temperature and integrated CO₂ capture and conversion using sodium glycinate to produce calcium carbonate. **Fuel**, v. 275, 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117887.

MIKAYILOV, J. I.; GALEOTTI, M.; HASANOV, F. J. The impact of economic growth on CO₂ emissions in Azerbaijan. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, part 1, p. 1558-1572, 2018.

NIEMINEN, H.; JÄRVINEN, L.; RUUSKANEN, V.; LAARI, A.; KOIRANEN, T.; AHOLA, J. Mass transfer characteristics of a continuously operated hollow-fiber membrane contactor and stripper unit for CO₂ capture. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 98, 103063, 2020.

NOCITO, F.; DIBENEDETTO, A. Atmospheric CO₂ mitigation technologies: Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 21, p. 34-43, 2020. DOI: 10.1016/j.cogsc.2019.10.002.

NORTH, M.; PASQUALE, R.; YOUNG, C. Synthesis of cyclic carbonates from epoxides and CO₂. **Green Chemistry**, v. 12, n. 9, p. 1514-1539, 2010.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. **Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado**. 2018. Disponível em: <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. Acesso em: 21 maio 2021.

PAULO, A. A. **Análise das emissões de gases e consumo específico de um grupo motor-gerador abastecido com misturas diesel, biodiesel e etanol**. 83 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) -- Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PHAM, T-H.; LEE, B-K.; KIM, J.; LEE, C-H. Enhancement of CO₂ capture by using synthesized nano-zeolite. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 64, p. 220-226, 2016.

PLAZA, M. G.; RUBIERA, F. Development of carbon-based vacuum, temperature and concentration swing adsorption post-combustion CO₂ capture processes. **Chemical Engineering Journal**, v. 375, 122002, 2019. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122002.

POLIAKOFF, M.; LEITNER, W.; STRENG, E. S. The Twelve principles of CO₂ CHEMISTRY†. **Faraday Discussions**, v. 183, p. 9-17, 2015. DOI: 10.1039/c5fd90078f.

PUBCHEM. **Carbon dioxide**. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/280>. Acesso em: 10 fev. 2021.

QUYN, D.; RAYER, A. V.; GOUW, J.; INDRAWN, I.; MUMFORD, K. A.; ANDERSON, C. J.; HOOPER, B.; STEVENS, G. W. Results from a pilot plant using un-promoted potassium carbonate for carbon capture. **Energy Procedia**, v. 37, p. 448-454, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.130.

REN, L.-X.; CHANG, F.-L.; KANG, D.-Y.; CHEN, C.-G. Hybrid membrane process for post-combustion CO₂ capture from coal-fired power plant. **Journal of Membrane Science**, v. 603, 118001, 2020. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118001.

SCHOLE, C. A.; KENTISH, S. E.; QADER, A. Membrane gas-solvent contactor pilot plant trials for post combustion CO₂ capture. **Separation and Purification Technology**, v. 237, 116470, 2020. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116470.

SCHULTHEIS, E. Contradicting settled science, Donald Trump says "nobody really knows" on climate change. **CBS News**, Dec. 2016.

SILVA, F. T. F.; CARVALHO, F. M.; CORRÊA, J. L.; JR, MERSCHMANN, P. R. C.; TAGOMORI, I. S.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. CO₂ capture in ethanol distilleries in Brazil: designing the optimum carbon transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 71, p. 168-183, 2018.

SILVA, J. A.; SANTOS, J. B. O. Captura de CO₂ utilizando o processo Ca-Looping com CaO e Al₂O₃. In: JORNADA DE JÓVENES INVESTIGADORES AUGM, 26., 2018, Mendoza. **A 100 años de la reforma universitaria: saber te hace libre**. [Mendoza: s.n.], 2018.

Sistema de Estimativas de Emissões de Gases do Efeito Estufa. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**. [S.l.]: Observatório do Clima, 2020.

Sistema de Estimativas de Emissões de Gases do Efeito Estufa. **Emissões totais**. 2017. Disponível em: http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 20 set. 2020.

SOUZA, D. B. **Estudo do comportamento físico-químico de rochas carbonáticas sob injeção de CO₂ supercrítico**. 84 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

TAJUDIN, M. A. B. A.; KHAN, M. F.; MAHIYUDDIN, W. R. W.; HOD, R.; LATIF, M. T.; HAMID, A. H.; RAHMAN, S. A.; SAHANI, M. Risk of concentrations of major air pollutants on the prevalence of cardiovascular and respiratory diseases in urbanized area of Kuala Lumpur, Malaysia. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 171, p. 290-300, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.12.057.

UNITED KINGDOM. Met Office. **Warming: a guide to climate change**. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2011.

VALLURI, S.; KAWATRA, S. K. Use of frothers to improve the absorption efficiency of dilute sodium carbonate slurry for post combustion CO₂ capture. **Fuel Processing Technology**, v. 212, 106620, 2021. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106620.

WILCOX, J. **Carbon capture**. New York: Springer, 2012. 324 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-2215-0.

World Health Organization. **Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease**. [S.l.], 2016.

YUAN, Y.; ROCHELLE, G. T. CO₂ absorption rate and capacity of semi-aqueous piperazine for CO₂ capture. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 85, p. 182-186, 2019.

ZHANG, Q.; CHENG, C.-L.; NAGARAJAN, D.; CHANG, J.-S.; HU, J.; LEE, D.-J. Carbon capture and utilization of fermentation CO₂: integrated ethanol fermentation and succinic acid production as an efficient platform. **Applied Energy**, v. 206, p. 364-371, 2017.

